

电压互感器对牵引网行波故障测距法的影响分析

李梦醒, 王硕禾, 郝伟康

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:牵引网行波故障测距技术通常采用牵引系统中已有的电压互感器设备获取电压暂态行波信号。为了研究电压互感器的传变特性对牵引网行波故障测距方法的影响,本文采用 ATP-EMTP 建立电压互感器仿真模型,并将其植入牵引网仿真线路中进行仿真研究。仿真实验综合考虑牵引供电方式、短路故障类型、电力机车以及故障发生位置等主要影响因素,运用 bior4.4 小波变换对互感器一次侧和二次侧的电压行波信号进行分析。研究结果表明,在不同的牵引线路情况和故障条件下,互感器均能准确无延时地传输故障行波和波头极性,说明电压互感器对故障行波的传变特性基本不会对行波故障测距法产生影响。因此可以利用线路已有的电压互感器获取故障信号进行行波测距法。

关键词:电压互感器;传变特性;小波变换;牵引网;行波故障测距

中图分类号:TM451⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)04-0078-05

0 引言

在基于行波原理的牵引网故障测距技术中,针对行波传输特点和牵引线路结构特点,宜选用电压信号作为故障测距行波信号。为了避免投资的加大及工程安装复杂程度的增加,因此一般采用牵引变电所以及分区所内已安装的电压互感器测量电压暂态行波信号。牵引网线路上的电压互感器一般为电磁式电压互感器,传统理论认为它不能有效地传变高频行波,其二次信号难以直接用于行波保护与行波定位,但后来国内学者的研究工作对此又有了新的认识^[1]。因此,进一步研究电压互感器的暂态行波传变特性对行波测距法的影响对在铁路牵引网中行波法的实际应用具有重要的理论和实际意义。

由于电压互感器对故障行波的传变特性测试实验难以直接在实际牵引网中进行,因此本文利用 ATP/EMTP 软件建立电磁式电压互感器仿真模型,分析其对冲击信号的传变特性。现有对电压互感器行波传变特性的分析基本上是基于理想的暂态故障行波,但其实牵引供电系统线路结构和运行方式复杂,对电压故障行波的影响因素很多^[2-3],这些因素会使故障行波发生畸变,因而可能会影响互感器对行波波头的传变特性,为了更加准确地研究互感器传变特性对牵引网行波故障测距法的影响,本文将电压互感器模型植入牵引线路中,在综合考虑多个不同的故障条件下,进行仿真实验。利用小波变换分析互感器一次侧和二次侧的电压行波信号来研究其传变特性对行波故障测距法的影响,目的在于决策行波测距原理在牵引网线路中的适用性。

1 电压互感器仿真模型的建立

电磁式电压互感器在暂态行波频带范围内的建模方法主要有两个,即基于分布参数的建模方法和基于频响参数的建模方法。基于分布参数的建模方法在充分了解互感器内部结构的基础上,通过做大量的外部实验得到的模型;而基于频响参数的互感器建模方法是在不需要考虑互感器的物理结构的基础上,只用一个信号源和示波器对互感器进行实际测量而得到的宽频传输特性^[1]。两种方法相比较而言,基于

收稿日期:2016-09-02 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.04.15

基金项目:北京铁路局京津城际牵引所供电能力测试项目(334023);河北省创新资助项目(yz2016006)

作者简介:李梦醒(1992-),女,硕士研究生,研究方向为牵引供电系统故障测距。E-mail:1548679637@qq.com

李梦醒,王硕禾,郝伟康.电压互感器对牵引网行波故障测距法的影响分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(4):78-82.

分布参数的建模方法建模结果更加精确可靠,因此本文根据基于分布参数的建模方法对互感器进行建模。

1.1 基于分布参数建模的基本理论

互感器线圈在冲击电压作用下会产生线圈间的静电感应、电磁感应和线圈内部的自由振荡过程。一般情况下,3 个过程同时发生,但各个时间段上占比不同且总是以其中一个为主^[4]。

1.1.1 线圈之间的静电感应过程

在分析互感器线圈的静电感应过程时将互感器等效为一个电容链,如图 1 所示。其中, C_1, C_2 分别为一次、二次线圈单位长度的对地电容, C_{k1}, C_{k2} 分别为一次、二次线圈单位长度纵向电容, C_3 为一次、二次线圈之间的电容。

假定电容参数沿线圈均匀分布,当单位电压作用于互感器一次线圈首端时,若二次线圈首端开路,则二次线圈首端的静电感应电压为

$$u_2(0) = \frac{C_3}{C_2 + C_3 + \sqrt{\frac{C_{k2}}{C_{k1}}[C_1(C_2 + C_3) + C_2 C_3]}} \quad (1)$$

静电感应电压分布瞬间完成,感应信号与原突变信号同时出现、极性相同。

1.1.2 线圈之间的电磁感应过程

忽略内部杂散电容的影响,互感器的电磁感应电路可以等效成两个互相耦合的线圈。二次侧电压滞后于一次侧电压,互感器暂态过程的最终电压为电磁感应电压。

1.1.3 线圈内部自由振荡过程

由于起始静态电压分布和最终电压分布不同,在互感器一次线圈内部将产生自由振荡过程,继而在二次线圈中感应出自由振荡电压。因此在自由振荡过程中将互感器等效为一电感、电阻和电容串并联回路。

1.2 电压互感器分布式参数的仿真模型

通过上述的理论分析,采用 ATP-EMTP 软件建立互感器的分布式参数仿真模型^[5-8],如图 2 所示。

图中互感器一次侧输入信号是防雷电波的冲击信号,互感器二次侧负载阻抗由 1Ω 增大至无穷大^[4]。图 3 分别为二次侧负载阻抗为 100Ω 和无穷大时,电压互感器的传变特性。

对上面的仿真结果进行分析,可得到以下结论:

在同一冲击信号下,二次侧负载阻抗分别为 100Ω 和无穷大时,电压互感器的二次侧电压变化趋势基本相同,说明互感器二次侧负载阻抗的大小对电压互感器的冲击信号传变特性的影响很小,其传变特性规律基本不变。电压互感器的冲击信号传变特性的基本规律为:在初始时刻,其静电感应过程占主要作用,由静电感应产生的二次侧电压信号极性与一次侧电压信号极性相同,并且时延很小,基本上可以忽略不计;在静电感应造成的突变点之后存在几十微秒内的自由振荡过程,该过程导致二次侧电压特性与一次侧电压特性不一致;冲击信号的传变后期则主要由电磁感应决定。

在初始时刻,其静电感应过程占主要作用,由静电感应产生的二次侧电压信号极性与一次侧电压信号极性相同,并且时延很小,基本上可以忽略不计;在静电感应造成的突变点之后存在几十微秒内的自由振荡过程,该过程导致二次侧电压特性与一次侧电压特性不一致;冲击信号的传变后期则主要由电磁感应决定。

2 电压互感器的仿真实验分析

行波故障测距法是根据行波传输理论实现对故障线路测距的方法。当牵引供电系统发生故障时,在故障点处将产生向两端线路传输的暂态信号即行波。牵引网典型的行波故障测距法就是利用故障时线路两侧检测点接收到线路内部初始行波浪涌波头之间的时间差来完成故障定位。因此牵引网行波法最关

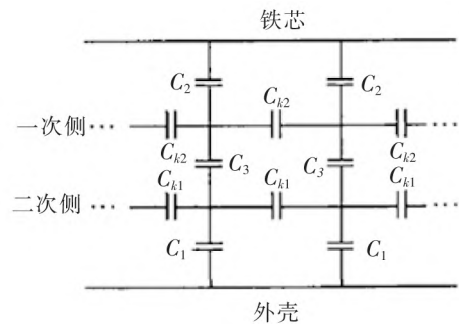


图 1 一次与二次线圈的电容耦合电路

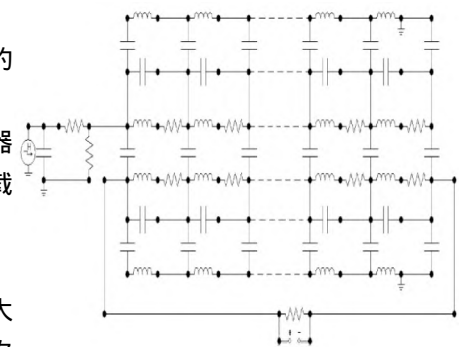


图 2 电压互感器仿真模型

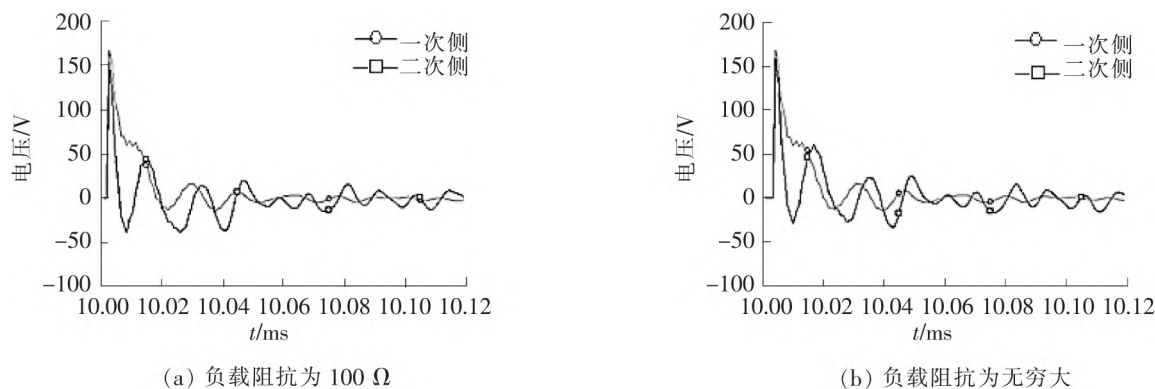


图 3 电压互感器的传变特性

键的是标定初始行波波头到达测量点的时刻。

在实际牵引网行波故障测距中通常在测量点采用电压互感器提取电压暂态行波信号后,再进行行波波头达到时刻的标定。但是电压互感器信号传变中期发生的自由振荡会导致二次侧电压信号与一次侧电压信号的特性不一致,即经过电压互感器传变后的行波信号的波头特性可能会与实际初始行波到达互感器一次侧时的波头特性不同,这一特性可能导致标定的行波波头到达时刻出现错误,从而使行波法得出的故障距离出现很大的误差^[5]。因此分析电压互感器对行波波头的传变特性,确定其对牵引网行波故障测距法的影响是必要的。

在牵引系统中,牵引网的供电方式、短路故障类型、电力机车以及故障发生位置等因素都会影响故障电压行波,继而可能会导致经电压互感器传变后的行波波头特性发生改变,使行波波头出现时延,标定的波头到达时刻出现误差。为了更全面准确地研究电压互感器对于行波波头特性的传变特性,将综合考虑这些因素进行仿真实验分析。

2.1 直供方式单线牵引网的仿真实验结果

牵引网仿真模型采用直供方式的 T 型等效模型,其中牵引变压器选用 VV 接线,牵引网悬挂系统选定的参数如图 4 所示。考虑在不影响研究对象电气量特性的条件下,对承力索(M)、接触线(C)、正馈线(F)以及钢轨(R)进行化简和等效。两条钢轨对称分布,将其等效为处于二者中间的单根导体,承力索与接触线共同传递电流,故将二者等效为一根导体且平行于钢轨与正馈线。最终牵引线路等效为相互平行的 3 条导体^[9],单位长度等效模型如图 5 所示,扩展单位长度等效模型即可得到任意长度线路模型。选定韶山 SS4B 型电力机车为机车研究模型,对其进行仿真建模^[10]。

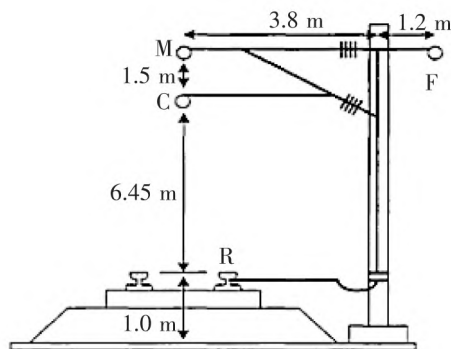


图 4 牵引网悬挂系统参数

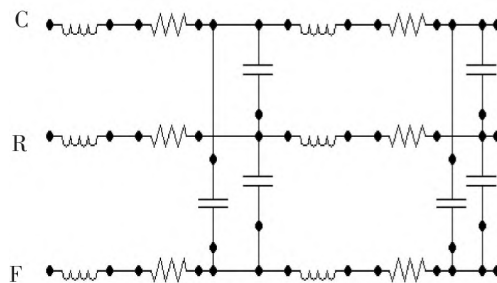


图 5 牵引网 T 型单位长度等效模型

仿真实验设定牵引线路发生接触网对钢轨短路故障(即 CR 故障)和接触网对回流线短路故障(即 CF 故障),并且故障发生位置(相对于牵引变压器)和线路电力机车的数量不同。利用不同尺度参数的 bior4.4 小波变换对电压互感器一、二次侧电压行波进行分析,确定标定波头到达时刻的采样点,该采样点数值的大小表示标定的初始行波波头到达时刻,极性表明行波的变化方向。结果如表 1、表 2 所示。在

不同的故障条件下,小波分析结果是标定波头到达时刻的采样点的极性均为负。

表 1 CR 短路后互感器两侧标定波头到达时刻的采样点

电力机车数量/辆	电压互感器接线侧	故障发生位置/km			
		3	10	20	30
0	一次侧	20 000	20 040	20 050	20 070
	二次侧	20 000	20 040	20 050	20 070
1	一次侧	20 000	20 020	20 040	20 090
	二次侧	20 000	20 020	20 040	20 090
2	一次侧	20 000	20 040	20 060	20 100
	二次侧	20 000	20 040	20 060	20 100

表 2 CF 短路后互感器两侧标定波头到达时刻的采样点

电力机车数量/辆	电压互感器接线侧	故障发生位置/km			
		3	10	20	30
0	一次侧	20 000	20 040	20 060	20 070
	二次侧	20 000	20 040	20 060	20 070
1	一次侧	20 000	20 020	20 040	20 090
	二次侧	20 000	20 020	20 040	20 090
2	一次侧	20 000	20 030	20 070	20 080
	二次侧	20 000	20 030	20 070	20 080

2.2 AT 供电方式复线牵引网的仿真实验结果

AT 供电方式复线牵引网与直供方式单线牵引网的仿真实验条件是相同的,利用不同尺度参数的 bior4.4 小波变换对电压互感器一、二次侧电压行波进行分析,确定不同仿真条件下波头到达时刻标定的采样点,结果如表 3、表 4 所示。在不同的故障条件下,小波分析结果是标定波头到达时刻的采样点的极性均为负。

表 3 CR 短路后互感器两侧标定波头到达时刻的采样点

电力机车数量/辆	电压互感器接线侧	故障发生位置/km			
		下行线 20	下行线 30	上行线 20	上行线 30
0	一次侧	20 010	20 060	20 100	20 060
	二次侧	20 010	20 060	20 100	20 060
1	一次侧	20 010	20 050	20 090	20 050
	二次侧	20 010	20 050	20 090	20 050
2	一次侧	20 010	20 040	20 080	20 040
	二次侧	20 010	20 040	20 080	20 040

表 4 CF 短路后互感器两侧标定波头到达时刻的采样点

电力机车数量/辆	电压互感器接线侧	故障发生位置/km			
		下行线 20	下行线 30	上行线 20	上行线 30
0	一次侧	20 010	20 050	20 090	20 050
	二次侧	20 010	20 050	20 090	20 050
1	一次侧	20 010	20 050	20 090	20 050
	二次侧	20 010	20 050	20 090	20 050
2	一次侧	20 010	20 040	20 080	20 040
	二次侧	20 010	20 040	20 080	20 040

2.3 仿真结果分析

从表 1~表 4 仿真结果中可以得出:在牵引网的供电方式、短路故障类型、电力机车以及故障发生位置等不同的条件下,电压互感器一、二次侧标定电压行波波头到达时刻的采样点数值大小和极性均是相同的,说明电压互感器两侧的行波波头到达时刻是相同的,极性也是相同的。电压互感器可以准确无时延地传变行波信号和极性,不会导致标定的行波波头到达时刻出现误差。

3 结论

采用 ATP-EMTP 建立了电磁式电压互感器的仿真模型,并将模型植入直供和 AT 供电方式的牵引网线路中进行仿真。在线路发生故障后运用 bior4.4 小波变换对互感器一次侧和二次侧的电压暂态信号进行分析,结果表明:

(1)在牵引供电系统中,牵引网的供电方式、短路故障类型、电力机车以及故障发生位置等不同的条件会对电压故障行波产生很大的影响,但是电压互感器能准确无时延地传输故障行波波头信号,并且不改变波头的极性。说明牵引网的供电方式、短路故障类型、电力机车以及故障发生位置等因素不会对电压互感器的行波传变特性产生影响。

(2)综合考虑多方面的主要影响因素的情况下,电压互感器对故障行波的传变特性不会使标定的行波波头到达时刻出现误差,从而不会对行波故障测距法的结果和精度产生影响。因此在牵引网故障测距中,可以利用线路已有电压互感器获取故障信号进行行波测距法。

参 考 文 献

- [1]周超,何正友,罗国敏.电磁式电压互感器暂态仿真及行波传变特性分析[J].电网技术,2007,31(2):84-89.
- [2]马燕宁.全并联 AT 双边供电方式的故障测距方法[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,27(3):79-83.
- [3]J. C. Das. Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics[M]. New York: Marcel Dekker, Inc. 2002.
- [4]曾祥君,刘正谊,屈明志,等.互感器暂态行波传输特性仿真分析与实验测试[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2004,1(1):71-75.
- [5]唐金锐.电力线路在线巡视监测及故障精确定位的研究[D].武汉:华中科技大学,2014.
- [6]王赞基.绕组变压器的波过程计算[D].北京:清华大学电机系,1985.
- [7]王赞基.超高压大型变压器线圈的暂态电压分布及其仿真[D].北京:清华大学电机系,1990.
- [8]唐炬,宋胜利,李剑,等.局部放电信号在变压器绕组中传播特性研究[J].中国电机工程学报,2002,22(10):91-96.
- [9]王奇.高速铁路牵引供电系统高次谐波谐振仿真研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [10]刘友梅.韶山 4B 型电力机车[M].北京:中国铁道出版社,1999.

Influence Analysis of Voltage Transformer on Traveling Wave Fault Location Method for Traction

Li Mengxing, Wang Shuohe, Hao Weikang

(School of Electrical and Electronics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Traveling wave fault location technology for traction usually adopts voltage transformers installed in traction system to measure the voltage transient traveling wave signal. In order to study the influence of transfer characteristic of voltage transformer on traveling wave fault location algorithm for traction, the simulation model of voltage transformer is established by adopting ATP-EMTP in this paper and applied to traction lines for simulation experiment. Considering the main influencing factors such as traction power supply mode, type of short circuit fault, electric locomotive and fault location, etc., the voltage traveling wave signal of primary side and secondary side of voltage transformer are analyzed by bior 4.4 wavelet transform. It is found that in two kinds of situations, voltage transformer can transform accurately the head part of traveling wave and the polarity of head part without time delay. Simulation results show that transfer characteristic of voltage transformer for traveling wave signal has no influence on traveling wave fault location algorithm. So Traveling wave fault location technology for traction can adopt voltage transformers installed in traction system.

Key words: voltage transformer; transfer characteristic; wavelet transform; traction; traveling wave fault location algorithm